

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04733

研究課題名（和文）地震波形を用いた地すべりのリアルタイムモニタリングとメカニズム解明

研究課題名（英文）Real-time monitoring of landslides and characterization of mechanisms using seismic waveforms

研究代表者

山田 真澄（Yamada, Masumi）

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：60456829

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 28,540,000円

研究成果の概要（和文）：地震波形を利用した地すべりのモニタリングとメカニズムの解明を目指して、地すべりの運動履歴の解明、地すべりを効率よく検知できる手法の開発、地震波形を利用した地すべり津波のシミュレーションと警報システムの開発、地すべりの摩擦特性の解明、地すべりの前兆となる繰り返し地震の解析を行った。複数のイベントの分析を詳細に行い、地震記録によって地すべりの早期検知や津波警報など二次災害を防止するための情報を提供できる可能性があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、現在まだ達成されていない地すべり即時検知システムを構築するための学術的基礎資料となるものである。地すべり運動と地震波形の関係を詳細に解析することにより、地震波形から地すべり運動を逆問題として推定することが可能となる。この研究成果が実用化されれば、将来は、地すべりの発生位置・時刻を遠隔かつリアルタイムに検出することが可能となる。また、地すべりが海底あるいは海岸で発生した時には、津波警報を出すことができる。

研究成果の概要（英文）：To monitor and understand the mechanism of landslides using seismic waveforms, we analyzed the dynamic history of landslides, developed a method for efficient landslide detection, developed a landslide tsunami simulation and warning system using seismic waveforms, clarified the frictional characteristics of landslides, and analyzed repeated earthquakes. Detailed analysis of multiple events revealed that seismic records have the potential to provide information such as rapid detection of landslides and tsunami warnings and prevent the secondary disasters.

研究分野：地震学

キーワード：地すべり 地震波形 リアルタイムモニタリング 地すべり検知

1. 研究開始当初の背景

近年、地震計を利用した地すべりのメカニズム解明の研究が注目を集めている。地震計は元々地震の観測を行うものであるが、規模が大きく速度の速い地すべりは地面の振動を発生させるため、地震計に信号が記録されることが分かってきた。地震計は日本国内において非常に高密度(約1000ヶ所)で設置され、トリガ方式ではなく24時間連続して観測されているため、地震以外の信号も容易にとらえることができる。

地すべりの研究は、これまで地質学や地形学、砂防工学を中心に進められてきたが、その多くは地すべり発生前の地形・地質学的な分析による事前予測、あるいは発生後の現地調査によるメカニズム解明など、発生前・発生後の調査研究に重点が置かれ、地すべり発生をリアルタイムでモニタリングしたり、時々刻々と変化する地すべり運動時の詳細な情報を得ることはできなかった。

地震計を利用することにより、他の調査では得られない地すべりの様々な情報を得ることができる。たとえば、これまで推測で求めていた地すべりの運動時の物理パラメータ(例えば、運動の向きや加速度、摩擦係数、斜面にかかる力など)を具体的に計算し、再現シミュレーションする事も可能である(Brodsky et al., 2003, GRL; Moretti et al., 2012, GRL)。また、地すべり発生時に多数の地震観測点で記録される波形を利用して、地震の震源決定と同じ要領で地すべりの場所の決定を行い、発生直後に速報で知らせる事も可能である。

2. 研究の目的

1) 地震計を利用した地すべりのリアルタイムモニタリングシステムの構築

本研究では、大規模で高速の地すべり(深層崩壊)によって発生する振動を地震計でとらえ、その地震記録から即時に地すべりの発生場所や発生時刻を検知し、規模やタイプを即時推定する地すべりのモニタリングシステムを構築する。研究業績16のアルゴリズムを防災科学技術研究所のHi-netのリアルタイム波形データに適用し、プロトタイプシステムを構築する。

2) 地すべりの前兆信号の検出と周辺の地質構造の把握

2015年北海道羅臼町で発生した海岸地すべりにおいて、前兆信号と見られるスティックスリップ状の地震波形が観測された(研究業績1)。このような前兆現象が地すべりで観測されたのは世界でも初めてのことで、前兆現象の発生条件やメカニズムを十分に解明する必要がある。地すべり周辺では3ヶ所でボーリングコア調査が行われているが、すべり面の深さは明らかにならなかった(田近ほか、2016、日本地質学会発表)。ピンポイントではなく、平面的な物理探査手法を実施することにより、すべり面の深さと形状を把握し、前兆現象を生み出すような地質構造を明らかにする。

3) 地すべりの前兆となるスティックスリップ運動の物理メカニズムの解明

羅臼地すべりの発生直前に観測されたスティックスリップ現象は、岩石実験などではよく観測されている(例えば、Dixon et al., 2014, Landslides; Passelègue et al., 2016, JGR)。岩石実験では、不均一なすべり面の構造(安定的にすべる領域と、ロックされている領域)がスティックスリップ現象の生成に起因していると言われ、それを説明するモデルも提唱されている(Aochi and Ide, 2016, JGR)。岩石実験や地震でのスティックスリップ現象を参考として、地すべりのスティックスリップ現象の物理メカニズムの解明を試みる。

3. 研究の方法

1) 地震波形を利用した地すべりの運動パラメータ推定

地震波形から地すべりの運動パラメータ(速度や摩擦係数)を推定するため、地震波形インバージョンと数値シミュレーションを行った。地震波形インバージョンには10~100秒程度の長周期の地震波形記録を利用し、地すべりの発生場所で斜面にどのような力が働いているかを推定した。シングルフォースのメカニズムを仮定することにより、NS, EW, UD3成分の時刻歴の力の履歴を得ることができる。摩擦係数を推定するため、地すべり発生前後の数値標高モデルを利用して、数値シミュ

レーションを行った。数値シミュレーションには粉体流をモデリングできる SHALTOP というコードを利用した(Mangeney et al., 2003)。SHALTOP は浅水近似を利用して、3 次元の地形上の流体の運動をモデリングすることができる。様々な摩擦係数を仮定してシミュレーションを行い、得られた力の履歴と波形インバージョンから得られる力の履歴を比較して、観測を最もよく説明できる摩擦係数を推定する。

2) 地震波形を利用した地すべりのリアルタイム検知

地すべりの信号は振幅が非常に小さく、地震波形記録を利用して自動検知することは困難であった。地震は国内だけでも毎日数百個も発生し、またその信号も極めて明瞭であることから、自動検知が比較的容易である。近年、地震波形記録の長周期成分を使用して振動源を推定する新しい手法が開発され、振幅の小さいイベントも検知することができるようになった(de Groot-Hedlin and Hedlin, 2015)。土砂災害、特に地すべりなどの大規模マスマーブメントは、長周期成分を効率よく出すことが知られており、この手法を有効に活用できることが期待される。規模の小さい地震は長周期成分をほとんど出さないため、長周期成分を活用すれば地震と土砂災害の区別も可能である。地震波干渉法を応用したイベント検知手法 AELUMA 法 (Automated Event Location Using a Mesh of Arrays, de Groot-Hedlin and Hedlin, 2015) を利用して、地震波形に記録された土砂災害イベントを検知する。AELUMA 法は振幅が小さく立ち上がり不明瞭な土砂災害のようなイベントの検出に適している。

3) 地すべりの前兆信号の検出

地すべりの前兆的な繰り返し地震は 2015 年北海道羅臼の地すべりで観測されており、2017 年グリーンランドの地すべりでも同様な波形が観測された。また、地すべりではなく雪崩や氷河の運動時にも繰り返し地震が観測されることが報告されている。アメリカ合衆国アラスカ州のイリヤムナ火山では定期的に雪崩が発生し、その前後に繰り返し地震が発生している。イリヤムナ火山の数十回のイベントの地震波形記録を解析し、繰り返し地震の発生するイベント、繰り返し地震の発生しないイベントを整理する。また、テンプレートマッチング法を利用して繰り返し地震を抽出し、その発生場所や時間間隔、振幅、波形の類似性を評価する。

4) すべり面の岩石のせん断実験

地すべりの挙動はすべり面のせん断強度や摩擦特性が影響している。2015 年北海道羅臼の地すべりでは、地すべりがすべり始める 1 日前から地すべりの前兆的な繰り返し地震が観測されている。このような挙動は、すべりを加速させる摩擦抵抗の減少(間隙水圧の上昇)と、すべり始めたときに減速させる摩擦特性が交互に発生していると予想される。この地層の特性を調べるため、地すべりのすべり面から試料を採取し、実験室において飽和非排水せん断試験を行った。実験にはリングせん断試験機を使用し、飽和した試料を圧密した後にせん断箱を非排水状態にし、せん断応力を上昇させて試料の非排水ピーク及び残留強度を調べた。その後、排水条件下で同様の実験を行い、試料のせん断速度依存特性を調べる。

4. 研究成果

1) 地震波形による飯山市の大規模山腹崩壊メカニズムの解明

2017 年 5 月 19 日に長野県飯山市で発生した山腹崩壊の地震波形の解析を行った。この山腹崩壊は、民家から離れた山間部で発生し、直接目視することが困難であったが、地震波形およびドローンでの写真撮影、さらに LiDAR によるデジタル標高モデルを利用する事によって、運動メカニズムが明らかになった。山腹崩壊は、体積の 7 割以上を占める南北に平行移動した大規模地すべりと、別の谷筋を流れた土石流の 2 つに分かれて発生したことが分かった。また、地震記録や表層の写真から、地すべりが先に発生し、約 1 分後に土石流が発生したことが分かった。地すべりの動きは長周期の地震波形で記録されており、推定された力の履歴は、50 秒間にわたって北から南への一方向性の動きを示した。土石流では短周期成分の大きな揺れが発生し、瓦礫の流れが川に沿って移動するにつれて信号は徐々に減衰していった。本解析では、飯山の斜面崩壊における 2 つのマスマーブメントが、全く異なる周波数の地動を発生させたことがわかった。このことは、地震計によって記録された振動が、斜面崩壊の運動メカニズムを理解する上で重要であることを示唆し

ている。また、地震信号と航空写真を組み合わせることで、地すべりのダイナミックな移動履歴を理解することができた。

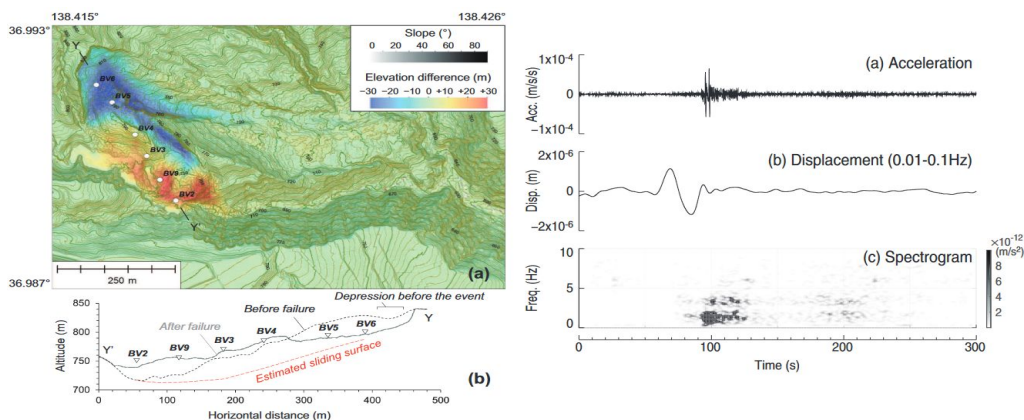


図1 飯山市の山腹崩壊の数値標高モデル(左)と地すべりの地震波形(右) (Yamada et al., 2020)

2) 地震波形による地すべりの検知手法の開発

2011 年台風 12 号(タラス)の通過時に観測された地震波形データに地震波干渉法を応用したイベント検知手法 AELUMA 法 (Automated Event Location Using a Mesh of Arrays, de Groot-Hedlin and Hedlin, 2015) を適用し、既存の手法では検出が難しい比較的小さい規模の地すべりの発生場所と発生時刻を特定することができた。検出した地すべりのうち、静岡県山間部で発生した地すべりは、規模が長さ・幅ともに 100 m スケールの小さな地すべりだったが、日本列島から台湾付近まで 3000 km もの長距離にわたって効率的に地震波を伝播していることが確認できた。地すべりの発生場所は急峻な山間部であることが多く、また規模の大きな地震や集中豪雨などがきっかけとなるため、地すべりの発生位置や時刻の早期特定、発生機構を解明するための現地調査は容易ではないが、地震波形データを用いることで、そうした地すべりの発生位置・時刻を遠隔かつリアルタイムに検出することが可能となる。

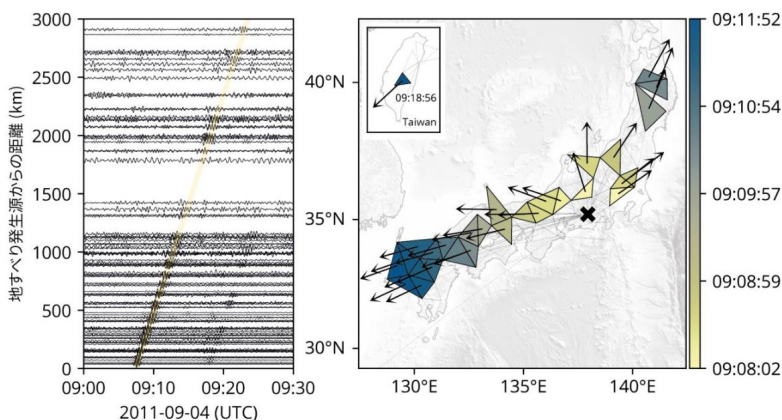


図2 (左)3000km にわたって伝播する地震波(右)震源決定を行うために利用する三角アレイの模式図 (Okuwaki et al., 2021)

3) 地震波形を利用した地すべり津波の再現

インドネシア気象気候地球物理庁と東京大学地震研究所と共同研究を行い、2018 年 12 月にインドネシアのアナク・クラカタウ島で発生した山体崩壊の地震波形解析を行った。この山体崩壊は、火山の噴火に伴って発生し、大規模な津波を引き起こした。津波によって 500 名近くの死者が出た。この山体崩壊は、地震のように強い揺れを伴わなかったため、通常の津波警報シ

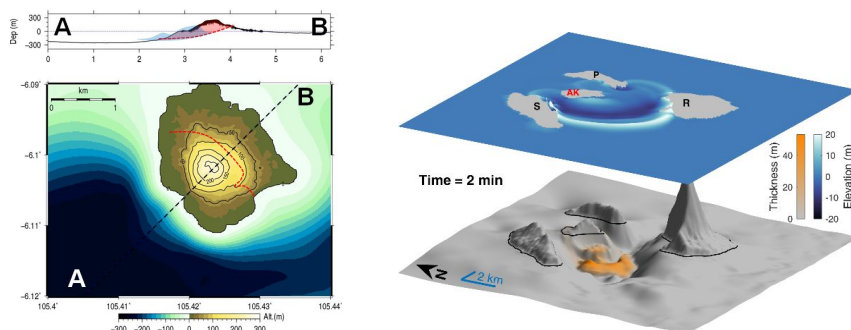


図3 インドネシアのクラカタウ島の山体崩壊の事例 (左) 標高モデル(右)津波シミュレーション

システムで検知することは困難であったが、地震波形の長周期成分を利用して地すべりの震源メカニズムを仮定して波形インバージョンを行ったところ、地すべりの体積や運動方向を推定することができた。この手法をリアルタイムで適用することができれば、山体崩壊発生の数分後に災害の発生を知ることができることが分かった。この解析手法を応用することにより、地すべりによって発生する津波警報を出ことができる。

4) 地すべりの前兆となる繰り返し地震の解析

地すべりの前兆信号と見られる繰り返し地震波形について、日本国外でのデータの収集及び分析を行った。アラスカ地震観測所が観測している Iliyamna 火山において、雪崩や地すべりに伴って度々スティックスリップ状の地震波形が観測されており、そのデータを過去 20 年にわたって収集した。Iliyamna 火山では、雪崩の発生直前のみならず、直後にも繰り返し地震波形が観測されることが分かり、地すべりの運動と斜面の不均質構造が密接に関わっていることが示唆される。Iliyamna 火山では、1994 年から大規模なイベントが 20 回発生している。そのうち、6 つのイベントの直前に繰り返し地震が観測されていた。また、3 つのイベントでは直後にも繰り返し地震が観測されていた。このことは、すべり始め、およびすべりが停止する直前に、すべり面における固着域において地震性の破壊が生じ、地震波形を記録したと考えられる。

5) すべり面のせん断実験による強度特性の解明

2015 年に発生した北海道羅臼町の斜面崩壊のすべり面の地質学的特性を分析した。地すべり移動体の中には幾層かの泥岩および凝灰岩の層が観察され、凝灰岩が泥岩より軟質(一部粘土化)であるため、すべり面が凝灰岩の中において形成されたと推測された。すべり面の強度特性を調べるため、地すべりの末端において露出した凝灰岩層から試料を採取し、飽和非排水せん断試験と飽和・排水せん断試験を行った。その結果、せん断速度の上昇に伴って、土試料の残留強度が低下していく傾向が確認できた。つまり、この地すべりは一旦不安定化して動き出すと、そのまま加速して運動する特性を有していることが実験から確認できた。

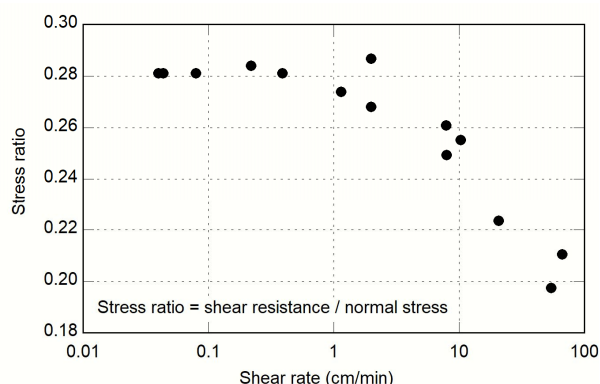


図5 飽和・排水せん断実験における凝灰岩資料のせん断速度と残留強度の関係

6) 摩擦のスケール依存性

日本国内で近年発生した深層崩壊を対象として、地震波形インバージョンと数値シミュレーションを行い、地すべりの動摩擦の変化を調べた。数値シミュレーションから得られた力と地震波形インバージョンから解かれた力を比較することにより、体積が 200 万 m³ 以上の地すべりでは、すべりの動摩擦係数が 0.3 から 0.4 であることが求められた。また、体積の大きい地すべりは動摩擦係数が小さい傾向があった。

我々の算出した動摩擦係数は、規模や地質が類似した地すべりを対象としているが、動摩擦係数の特性は過去の研究で得られた体積と動摩擦係数の経験的な関係と整合的である。

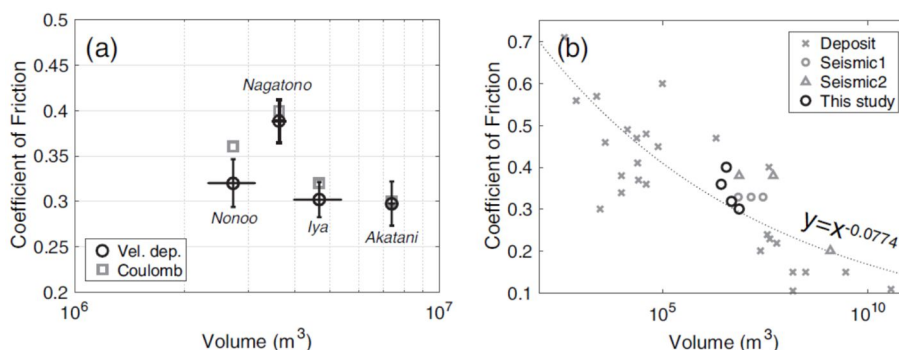


図6 地すべりの体積と推定した動摩擦係数の関係。(左)本研究の結果 (右) 既往の研究との比較。(Yamada et al., 2018)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamada Masumi, Mangeney Anne, Matsushi Yuki, Matsuzawa Takanori	4. 巻 15
2. 論文標題 Estimation of dynamic friction and movement history of large landslides	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 1963 ~ 1974
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10346-018-1002-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamada Masumi, Matsushi Yuki, Matsuzawa Takanori	4. 巻 274
2. 論文標題 Dynamic movement history of the liyama slope failure revealed from seismic data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 105696 ~ 105696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enggeo.2020.105696	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okuwaki Ryo, Fan Wenyuan, Yamada Masumi, Osawa Hikaru, Wright Tim J	4. 巻 0
2. 論文標題 Identifying landslides from continuous seismic surface waves: a case study of multiple small-scale landslides triggered by Typhoon Talas, 2011	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 0
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggab129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 山田真澄, 松四雄騎	4. 巻 54
2. 論文標題 北海道知床半島羅臼町における海岸斜面の変動について	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 35-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yamada, M., J. Mori, Y. Matsushi, and J. Caplan-Auerbach
2. 発表標題 Seismic events induced by a landslide: what can they tell about the landslide?
3. 学会等名 EGU General Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田真澄・綿田辰吾・中道治久・Mulia Iyan・Karyono
2. 発表標題 2018年アナク・クラカタウ山体崩壊：近地地震波から求めた地すべりの運動メカニズム
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会、千葉（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 綿田辰吾・山田真澄・Mulia Iyan・Karyono・Aditiya Arif・Sianipar Dimas
2. 発表標題 2018スンダ海峡津波の発生メカニズム
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会、京都
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Watada・Iyan E. Mulia・Masumi Yamada・Karyono・Arif Aditiya
2. 発表標題 The 2018 Sunda Strait Tsunami Caused by the Edifice Collapse of Anak Krakatau Volcano
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Watada · Iyan Mulia · Masumi Yamada · Karyono · Arif Aditiya · Dimas Sianipar
2. 発表標題 The 2018 Sunda Strait Tsunami Caused by the Edifice Collapse of Anak Krakatau Volcano
3. 学会等名 International Symposium on the 2019 Tsunamis in Palu (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamada, M, Y. Matsushi, M. Kamo, and T. Matsuzawa
2. 発表標題 Dynamic movement history of the 2017 Iiyama landslide revealed from drone image and seismic data
3. 学会等名 4th Slope Tectonics Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamada, M and H. Ishida
2. 発表標題 Evaluation of the P-wave detection method using higher order statistics
3. 学会等名 IAG- IASPEI 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石田寛史, 山田真澄
2. 発表標題 kurtosisを利用したリアルタイムP波検知手法
3. 学会等名 日本地球惑星連合大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

地震はは語る
<http://www.eps.sci.kyoto-u.ac.jp/research/advance/07/index.html>
2017年5月19日飯山市の山腹崩壊の調査報告
<http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/~masumi/eq/i iyama2017/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
インドネシア	気象気候地球物理庁	火山地質災害軽減センター		
フランス	IPGP			
米国	Western Washington University			
その他の国・地域	国立台湾大学			
フランス	パリ地球物理研究所			